

К.Г. Грибанов, В.И. Захаров

О ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА СООТНОШЕНИЯ СОДЕРЖАНИЙ НДО/Н₂O В АТМОСФЕРЕ ИСПОЛЬЗУЯ НАБЛЮДЕНИЯ ИЗ КОСМОСА УХОДЯЩЕГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Свердловский филиал НИКИЭТ, г. Заречный Свердловской обл.

Поступила в редакцию 1.07.99 г.

При обработке эмиссионных спектров атмосферы, наблюдаемых из космоса сенсором IMG в диапазоне 650–2000 см⁻¹ с разрешением 0,1 см⁻¹, были обнаружены достаточно интенсивные линии молекулы НДО. Анализ наблюдаемых в районе окна прозрачности сигналов изотопических модификаций молекулы воды указывает на возможность их использования для определения отношения концентраций НДО/Н₂O в атмосфере. В качестве примера применения предлагаемого способа для определения отношения концентраций НДО/Н₂O приводятся результаты обработки данных сенсора IMG/ADEOS в некоторых точках наблюдения атмосферы над океаном и сушей тропических и средних широт в условиях безоблачной атмосферы.

В связи с растущим парниковым эффектом на Земле становится актуальной проблема наблюдения за изменениями параметров гидрологического цикла. Разрабатываются методы определения параметров водного цикла из космоса [1]. Появление спутниковых сенсоров нового поколения в дальней инфракрасной области со спектральным разрешением лучше 1 см⁻¹, таких как IMG/ADEOS [2], позволило наблюдать эмиссионные спектры молекул атмосферы с хорошо разрешенной вращательной структурой, включая сигналы от различных изотопов парниковых газов [3]. Одним из перспективных методов мониторинга гидрологического цикла может быть измерение соотношения концентраций НДО/Н₂O в атмосфере [4,5]. Это обстоятельство стимулирует исследователей к тщательному анализу наблюдаемых из космоса сенсором IMG спектров уходящего теплового излучения для разработки методов адекватного определения соотношения концентраций НДО/Н₂O.

В данной статье предлагается метод использования наблюдаемых сигналов молекул НДО и Н₂O в области окна прозрачности для определения отношения количеств НДО/Н₂O в атмосфере, предполагающий, что вертикальные профили концентраций НДО и Н₂O совпадают с точностью до искомого множителя.

С помощью программного обеспечения FIRE-ARMS [6] и базы данных спектральных параметров HITRAN-96 [7] были надежно идентифицированы линии молекулы НДО в районе 1206 см⁻¹, наблюдаемые сенсором IMG (рис. 1). Сигнал достаточно сильный и определяется исключительно молекулой НДО. Вклад других атмосферных газов, включая молекулу Н₂¹⁶O, в этой области спектра атмосферы практически отсутствует.

Спектр теплового излучения атмосферы для случая наблюдения в надир определяется выражением [8]:

$$W(\nu) = \varepsilon(\nu)B(\nu, T_0) \exp\left(-\int_0^H K_{\text{атм}} dh\right) + \int_0^H K_{\text{атм}} B(\nu, T(h)) \exp\left(-\int_h^H K_{\text{атм}} dh'\right) dh. \quad (1)$$

Здесь W – спектральная плотность энергетической яркости излучения, Вт/(м²·см⁻¹·ср); h – высота; $K_{\text{атм}}$ – коэффициент поглощения атмосферных газов; $B(\nu, T(h))$ – функция излучения черного тела; $\varepsilon(\nu)$ – коэффициент излучения поверхности Земли; T_0 – температура поверхности Земли; H – высота верхней границы атмосферы. Коэффициент поглощения может быть выражен следующим образом:

$$K_{\text{атм}}(\nu, h) = N_0(h) \sum_{i=1}^{N_g} n_i(h) \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij} \sigma_{ij}(\nu, T(h)), \quad (2)$$

где ν – волновое число, см⁻¹; $N_0(h)$ – общая концентрация молекул в атмосфере на высоте h , мол/см⁻³; $T(h)$ – высотный профиль температуры; $n_i(h)$ – относительная концентрация молекул i -го газа всех изотопических модификаций; α_{ij} – естественная распространенность j -й изотопической модификации i -го газа (это константы, введенные в HITRAN-96); σ_{ij} – сечение поглощения, см², вычисляемое с помощью line-by-line суммирования и спектральных параметров из базы данных HITRAN-96; N_g – число учитываемых газов; N_i – число принимаемых в рассмотрение изотопических модификаций i -го газа.

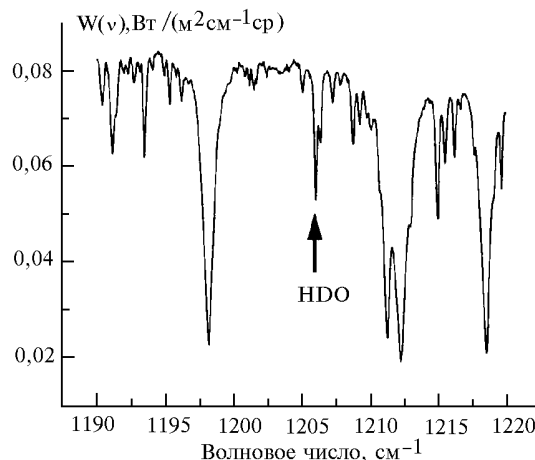


Рис. 1. Характерный вид сигнала НДО в спектрах излучения атмосферы, наблюдаемых сенсором IMG/ADEOS

При восстановлении высотных профилей встроенный в FIRE-ARMS алгоритм минимизирует следующую целевую функцию:

$$F = \sum_{i=1}^M \left[\frac{W^{obs}(v_i)}{W^{calc}(v_i)} - \frac{W^{calc}(v_i)}{W^{obs}(v_i)} \right]^2, \quad (3)$$

где W^{obs} , W^{calc} – наблюдаемый и вычисленный спектры соответственно.

В данной работе восстановление отношения количества HDO/H₂O проводилось с помощью ПО FIRE-ARMS в три этапа. Первый этап – восстановление высотного профиля температуры $T(h)$. Для этого использовались два спектральных интервала 665–695 и 817–821 см⁻¹, причем последний исключительно для определения температуры поверхности Земли в точке наблюдения. На втором этапе восстанавливался высотный профиль H₂O [$n_1(h)$ в (2)] с использованием участка спектра 1170–1200 см⁻¹. Далее делалось предположение, что высотный профиль HDO с точностью до множителя α совпадает с профилем H₂O и вариацией этого множителя осуществлялась минимизация (3) с использованием участка спектра 1205–1207 см⁻¹, где сигнал определяется исключительно молекулой HDO. На рис. 2 представлен образец подгонки вычисленного и измеренного спектров в результате восстановления профилей температуры, H₂O и величины α .

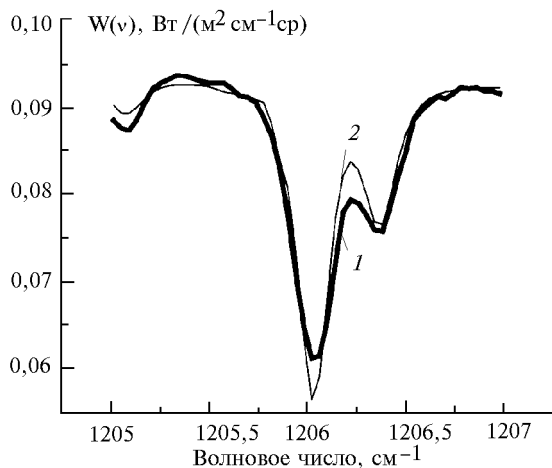


Рис. 2. Образец подгонки измеренного (1) и вычисленного (2) спектров после процедуры восстановления профилей температуры, H₂O и величины α

Результаты восстановления текущих значений α в атмосфере в некоторых точках наблюдения над океаном и суши приведены в таблице.

Полученные значения отношения концентраций HDO/H₂O, приведенные в таблице для низких и средних широт, показывают высокую вариабельность наблюдаемых значений α , которая составляет около 300%. Харак-

терная ошибка при восстановлении профиля концентрации H₂O, по данным IMG, варьируется на разных высотах в интервале 10–20% [9], что при вышеприведенных масштабах изменения α представляется вполне приемлемой точностью для предлагаемого метода определения отношения концентраций HDO/H₂O в атмосфере.

Дата и время измерения (по Гринвичу)	Координаты места: широта/долгота, град	α , %
01.04.97, 11:19	14.589 с.ш./7.103 з.д.	0,044
08.04.97, 09:50	13.602 с.ш./14.824 в.д.	0,028
24.04.97, 10:57	29.742 с.ш./1.003 в.д.	0,031
19.06.97, 07:10	69.801 с.ш./151.975 з.д.	0,019
04.04.97, 11:28	49.873 с.ш./1.422 з.д.	0,068
06.04.97, 14:25	50.849 ю.ш./66.402 з.д.	0,031

Согласно литературным данным [4,5], степень отличия отношения концентраций HDO/H₂O от равновесного (α равновесное составляет около 0,031%, по данным из HITRAN-96), наблюдаемая в различных регионах планеты, содержит важную информацию о водном цикле. Глобальный мониторинг долговременных изменений параметра α позволит накопить необходимую базу данных для изучения характерных трендов в гидрологическом цикле, вызываемых растущим парниковым эффектом.

В заключение следует отметить, что предложенный метод годится для любых технологий восстановления высотных профилей и может быть эффективно использован для картирования горизонтальных сезонных распределений отношения концентраций HDO/H₂O, по данным наблюдений эмиссионных спектров атмосферы со спутников, такими сенсорами, как IMG/ADEOS, IASI/METOP и др.

Данные исследования проводились в рамках работ по международной программе ADEOS, объявленных MITI, EA, NASDA (Япония). Авторы благодарны Dr. Aoki, обратившему наше внимание на важность проблемы мониторинга отношения HDO/H₂O в атмосфере и указавшему на имеющиеся публикации (см. список литературы).

1. POLDER data use plan // Proceedings of the first ADEOS Symposium/Workshop. V. 1. December 6–9. 1994, Kyoto, Japan.
2. Kobayashi H. // IMG program report. The third ADEOS Symposium/Workshop. January 26–30, 1998. Sendai, Japan.
3. Грибанов К.Г., Захаров В.И., Ташкун С.А. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. N 4. С. 372.
4. Ciais Ph. and Jouzel J. // JGR. 1994. V. 99. P. 16793.
5. Jouzel J., Coster R.D., Suozzo R.J., Russel G.L., White J.W., and Broecker W.S. // JGR. 1995. V. 96. P. 7495.
6. Griбанov K.G., Zakharov V.I., Tashkun S.A., and Tyuterev V.I.G. // A new generation userfriendly software for infrared atmospheric remote sensing from space. 8th International Workshop on Atmospheric Science from Space using High Resolution Fourier Transform Spectrometry at Meteo France in Toulouse. Nov. 16–18, 1998.
7. Rothman L.S., Gamache R.P., Tipping R.H. et al. // JQSRT. 1992. V. 48. P. 469.
8. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.Н. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеоздат, 1970.
9. Interferometric Monitor for Greenhouse Gases // IMG Project Technical Report / Ed. by Hirokazu Kobayashi. Tokyo, Japan. March 30, 1999.

K.G. Griбанov, V.I. Zakharov Possibility of HDO/H₂O Concentration Ratio Monitoring from Space Using Thermal Radiation of Atmosphere.

Quite intensive absorption lines of HDO were found during the processing of atmospheric radiance in the range of 650–2000 cm⁻¹ with resolution of 0.1 cm⁻¹ observed from Space by IMG/ADEOS sensor. The analysis of signals from HDO in the range of atmospheric transparency window shows that the derivation of HDO/H₂O ratio in atmosphere is possible. As an example of application of the suggested method, the results of HDO/H₂O ratio retrieval from IMG observations over several points in tropical and mid-latitude areas under clear sky conditions are presented.